

PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicants: Günter REIS, Florian STEINMEYER, Markus VESTER
Application No.: NEW
Filed: December 27, 2001
For: FLUX PUMP WITH A SUPERCONDUCTOR AND
SUPERCONDUCTING ELECTROMAGNET TO BE OPERATED
THEREWITH
Docket No.: 32860-000257/US



PRIORITY LETTER

December 27, 2001

Honorable Commissioner of Patents and Trademarks
Washington, DC 20231

Dear Sirs:

Pursuant to the provisions of 35 U.S.C. 119, enclosed is/are a certified copy of the following priority document(s).

<u>Application No.</u>	<u>Date Filed</u>	<u>Country</u>
100 65 400.2	December 27, 2000	Germany

In support of Applicant's priority claim, please enter this document into the file.

Respectfully submitted,

HARNESS, DICKEY, & PIERCE, P.L.C.

By

Donald J. Daley, Reg. No. 34,313

P.O. Box 8910
Reston, Virginia 20195
(703) 390-3030



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 100 65 400.2

Anmeldetag: 27. Dezember 2000

Anmelder/Inhaber: Siemens Aktiengesellschaft,
München/DE

Bezeichnung: Flusspumpe mit Hochtemperatursupra-
leiter und damit zu betreibender supra-
leitender Elektromagnet

IPC: H 01 F 6/00

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 15. März 2001
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Waasmaier

Beschreibung

Flusspumpe mit Hochtemperatursupraleiter und damit zu betreibender supraleitender Elektromagnet

5

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Flusspumpe des Gleichrichter-Typs mit HT_c (Hochtemperatur) supraleitenden Schaltern und einen mit dieser Flusspumpe zu betreibenden HT_c -supraleitenden Elektromagneten.

10

Zum Beispiel für die Kernspin-Tomographie sind hohe Magnetfelder mit dazu auch hoher zeitlicher Konstanz der jeweiligen Magnetfeldstärke erforderlich. Hierfür sind Elektromagnete mit supraleitenden Spulen entwickelt worden. Schon seit Jahrzehnten sind solche Spulen bekannt, die aus Tieftemperatur- (LT_c -) Supraleitermaterial wie Niob-Zinn oder Niob-Titan bestehen. Zu betreiben sind solche Magnete im Temperaturbereich von etwa 4 K Temperatur.

15

Seit etwa einem Jahrzehnt sind auch supraleitende Materialien des Hochtemperatur-Typs (HT_c -Supraleiter) bekannt, die bis über Temperaturen der flüssigen Luft, d.h. bei Temperaturen kleiner als 77°K supraleitend sind. Es sind auch bereits Elektromagnete mit HT_c -supraleitender Spule hergestellt worden, die für hohe Magnetfelder z.B. bis zu Temperaturen kleiner etwa 40 K verwendbar sind. Diese niedrigere Betriebstemperatur beruht darauf, dass die HT_c -Stromtragfähigkeit dafür verwendeter HT_c -Supraleiter-Materialien, z.B. Wismutcuprate wie $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ und $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ und Seltenerdcuprate $\text{RE Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ mit $\text{RE} = \text{Nd, Gd, Sm, Er, Y}$, nur bis zu einer von der Höhe des herrschenden Magnetfeldes abhängig begrenzten jeweiligen Betriebstemperatur ausreichend ist.

25

30

Ein einmal in einer solchen supraleitenden Spule eines Magneten erzeugter und fließender Kurzschluss-Supraleitungsstrom hält im Idealfall andauernd an. Um einen solchen supraleitenden Strom in eine Supraleiterspule einzuspeisen, wird z.B.

35

eine als Flusspumpe bekannte Einrichtung verwendet. Eine solche Flusspumpe ist z.B. bekannt aus „Study of Full-Wave Superconducting Rectifier-Type Flux-Pumps“, in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32 (1996) pp. 2699-2702 und aus „On Fully Superconducting Rectifiers and Flux Pumps“, Cryogenics, Mai 1991, Seiten 262-275.

Der genannte Stand der Technik bezieht sich ausschließlich auf Supraleiter des Tieftemperatur (LT_c -) Typs, d.h. auf Materialien, wie z.B. des genannten Niob-Zinns und Niob-Titans. In Figur 1 eines Beispiels einer Flusspumpe 2 des Gleichrichtertyps des Standes der Technik (aus IEEE Transactions ... wie oben) ist mit 11 die supraleitende Spule mit LT_c -Supraleiter eines Elektromagneten 111 bezeichnet, wie er z.B. für die schon erwähnte Kernspin-Tomographie bekanntermaßen verwendet wird. Mit 12 ist eine Stromquelle bezeichnet, die die elektrische Energie liefert, mit der der Aufbau des in der Spule 11 im Betrieb des Elektromagneten fließenden Supraleitungsstroms bewirkt wird. Mit 13 ist ein Transformator mit einer Primärspule 113 und bei diesem Beispiel mit 2 in Reihe geschalteten Sekundärspulen 213 und 313 bezeichnet. Mit 15 und 16 sind zwei Schalter für das Schließen und Unterbrechen des im Stromkreis der jeweiligen Sekundärspule 213 bzw. 313 fließenden supraleitenden Stromes bezeichnet. Diese beiden Sekundärspulen und Schalter bestehen im Stand der Technik aus LT_c - und in der noch zu beschreibenden Erfindung jedoch aus HT_c -supraleitendem Material. Um als Transformator 13 wirken zu können, liefert die Stromquelle 12 generell bezeichnet einen Wechselstrom, d.h. einen Strom mit wiederkehrend aufeinanderfolgend entgegengesetzter Stromrichtung. Entsprechend dem Takt dieser Stromrichtungswechsel werden die Schalter 15 und 16, und zwar jeweils einander entgegengesetzt, geöffnet und geschlossen. Es erfolgt damit eine Gleichrichtung des durch die mit 20 und 21 bezeichneten Leitungen fließenden elektrischen Stromes. Dieser Strom ist der Speisestrom für die Spule 11 des Elektromagneten. Mit 23 ist eine bekannte, hier nicht näher ausgeführte, Sicherungseinrichtung zum

Schutz der Flusspumpe 2 bezeichnet. Mit 25 ist ein Steuersystem für die Steuerung des Taktes der Wechsel des Speisestromes der Stromquelle 12 und der Schalter 15 und 16 bezeichnet.

5

In der bekannten Flusspumpe der Figur 1 sind die Schalter 15 und 16 Tieftemperatur- (LT_c -) Supraleiterschalter. Deren Zustände „Offen„ und „Geschlossen„ sind durch die Zustände des in ihnen enthaltenen Leitermaterials „supraleitend“ oder „normalleitend„ gegeben. Der supraleitende Zustand liegt bei entsprechend tief abgekühltem Zustand vor. Durch Erwärmen des jeweiligen Schalterelements wird dieses in den normalleitenden Zustand, der einem geöffneten Schalter entspricht, umgewandelt. Diese Umwandlung ist reversibel.

15

In wie bekannter Weise durch periodisches Umschalten der Schalter 15 und 16 kann die Spule 11 des Elektromagneten bzw. deren Stromkreis mit supraleitendem Strom sukzessive aufgeladen wird, so dass entsprechend sukzessive in der Spule 11 des Elektromagneten ein korrespondierendes Elektromagnet-Gleichfeld hoher Magnetfeldstärke bzw. hohen Magnetflusses erzeugt wird, das bei aufrechterhaltener Supraleitung permanent ist. In weitem Maße gilt diese Permanenz für die LT_c -Supraleitung und die dafür verwendeten, schon oben angegebenen Materialien. Zum Beispiel ein einmal aufgeladener Supraleiter-Elektromagnet beispielsweise eines Kernspin-Tomographen hält seine Magnetfeldstärke über lange Zeit so konstant, dass mit diesem Magnetfeld die extrem hohen Anforderungen an Konstanz des Feldes für Kernspin-Tomographie eingehalten werden. Ein Nachladen ist z.B. erst nach etwa 100 Stunden erforderlich, vorausgesetzt dass keine technischen Mängel oder betriebsmäßige Fehler vorliegen.

25

30

35

In anderem Zusammenhang, nämlich für im Kryobereich mit supraleitender Wicklung arbeitende elektrische Speicher für extrem rasch verfügbare elektrische Energie mit gefordert hoher Spitzenleistung ist vorgeschlagen (IEEE, ISPD'99, Toronto

26.-28. Mai 1999, S. 91-94) worden, im elektrischen Steuersystem solcher Speicher Cool MOSFETs für dort erforderliche Schalter zu verwenden. Es sind dies MOSFETs, die bis 1000 V und bei tiefen Temperaturen um etwa 77 K deshalb vorteilhaft verwendet werden, da diese MOSFETs in diesem Temperaturbereich sehr geringen elektrischen Durchgangswiderstand haben. In ihnen entstehen damit trotz des im Stoßbetrieb hohen Stromdurchflusses nur entsprechend geringe Eigenverluste an elektrischer Energie. Diese MOSFETs dienen in dieser Anwendung damit der Energieeinsparung beim Betrieb solcher Spitzenleistungs-Speicher.

Bei der Erfindung befinden sich der Transformator 13 und die MOSFET-Schalter im gekühlten Medium bzw. Raum. Von Vorteil ist hierbei, dass für die auf der Primärseite des Transformators fließenden kleinen Ströme elektrische Leitungen mit nur lediglich geringem Querschnitt erforderlich sind und diese Leitungen nur entsprechend wenig Wärmeleitvermögen in den kalten Raum hinein haben.

Insbesondere ist es für die Erfindung bedeutsam, diese MOSFETs im Bereich niedrigst möglichen elektrischen Durchgangswiderstandes derselben bei geschlossenem Schalter zu betreiben. Dies deshalb, weil bei der Erfindung der in der Magnetspule 11 fließende elektrische Strom fortlaufend auch durch die jeweils geschlossenen Schalter fließt und dort Ohm'sche Verluste bewirkt. Diese Verluste vermindern die geforderte hohe Konstanz des Magnetfeldes, das durch die Magnetfeldspule 11 zu erzeugen ist. Die wie erfindungsgemäße Verwendung der MOSFETs bei tiefen Temperaturen als Schalter für das fortlaufende Konstanthalten dieses Magnetfeldes ist daher von Vorteil für optimierte Lösung der Aufgabenstellung.

Die Grundprinzipien dieser bekannten Flusspumpen haben nur zu einem gewissen Maße für die bei der Erfindung vorgesehene Verwendung von Hochtemperatur- HT_c -Supraleitungs-Materialien Gültigkeit. Es sind für erfindungsgemäße Projekte und Vor-

richtungen mit solchen Materialien vielfach besondere oder andersartige Bedingungen und Umstände zu berücksichtigen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, für eine erfindungsgemäße Flusspumpe bzw. für die erfindungsgemäße Kombination einer solchen Flusspumpe und eines Supraleiter-Elektromagneten für hochkonstantes Magnetfeld die Maßnahmen anzugeben, mit denen die entsprechenden Vorrichtungen mit HT_c-Supraleiter-Material in vorteilhafterweise realisiert werden können.

Insbesondere zur zusätzlichen Erläuterung zu der nachfolgenden Beschreibung der Erfindung dienen auch die nachfolgend erörterten Figuren, die auch Offenbarungsinhalt zur Erfindung enthalten.

Figur 1 zeigt ein Prinzipbild eines bekannten Schaltungsaufbaues, wie er auch bei der vorliegenden Erfindung in Betracht kommt.

Figur 2 zeigt eine Variante zur Gleichrichterschaltung der Figur 1.

Figur 3 zeigt in Ansicht und als Schnitt I-I' einen prinzipiellen Aufbau einer erfindungsgemäßen Kombination von Flusspumpe und Elektromagnet in einem gemeinsamen Kryostaten.

Figur 4 zeigt eine Ausführungsform für einen erfindungsgemäßen Schalter der Gleichrichterschaltung einer erfindungsgemäßen Flusspumpe.

Figur 4A zeigt ein Diagramm.

Figuren 5A und 5B zeigen in Auf- und Seitenansicht ein Ausführungsbeispiel für eine MOSFET-Schalteranordnung.

Figur 6 zeigt ein Betriebsdiagramm.

In der Figur 1 ist für die Flusspumpe 2 eine auch als Zweiweg-Gleichrichtung mit zwei Sekundärspulen bezeichnete Schaltung gezeigt. An deren Stelle kann für die Erfindung auch
5 eine ebenfalls als gleichrichtend wirkende Brückenschaltung verwendet werden, wie sie aus der Elektrotechnik, dort mit Dioden, generell bekannt ist und hier als eine vorgesehene Ausführung für die Erfindung in Figur 2 gezeigt ist. Mit der
10 Figur 1 wenigstens im wesentlichen übereinstimmende Einzelheiten dieser Brückenschaltung der Figur 2 haben dieselben, bereits definierten Bezeichnungen. Mit 115 und 116 sind die zwei zusätzlichen Schalter der insgesamt vier Schalter umfassenden Brückenschaltung bezeichnet. Bei dieser Schaltung bedarf es nur einer Sekundärspule 213 des Transformators 13.

15 Eine vorteilhafte Maßnahme der Erfindung ist, wenigstens die supraleitende Spule 11 des Elektromagneten und seine zugehörige Flusspumpe im Vakuumraum eines und desselben Kryostaten 100 anzuordnen. Vorteil dieser Maßnahme ist, dass damit nur
20 eine Kälte-Versorgungseinrichtung und nur ein Kryostatgefäß erforderlich sind.

Für die die oben angegebene Aufgabe lösende vorliegende Erfindung gemäß Patentanspruch 1 und deren Weiterbildung gemäß
25 den Unteransprüchen ist z.B. eine zu berücksichtigende besondere Bedingung diejenige, dass die erfindungsgemäße Vorrichtung mit supraleitender Flusspumpe und supraleitendem Elektromagneten, erfindungsgemäß mit HT_c-Supraleiter-Material für vorteilhafterweise höhere Betriebstemperaturen ausgerüstet
30 ist und dazu derart ausgeführt sein muss, dass mit der Flusspumpe ein Nachladen des Elektromagneten im Abstand von jeweils wenigen Sekunden ausgeführt werden kann. Dies ist erforderlich, weil für eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit HT_c-Supraleiter-Material die geforderte Konstanz der Magnetfeldstärke des Magneten innerhalb der vorgegebenen Toleranz-
35 grenze nur mit derart kurzfristig aufeinander folgendem Nachladen einzuhalten ist. Dies beruht im wesentlichen auf dem

Austausch des bekanntermaßen verwendeten LT_c -Supraleiter-Materials gegen das erfindungsgemäß verwendete HT_c -Supraleiter-Material. Auch ist zu berücksichtigen, dass bei einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit HT_c -Supraleiter-Material die

5 Flusspumpe und der Magnet bei vorteilhafterweise höherer Temperatur, beide aber bei verschiedenen Temperaturen zu betreiben sind, die Flusspumpe z.B. nahe unterhalb 77 K und der Elektromagnet im Bereich von etwa 40 K.

- 10 Für die erfindungsgemäße Lehre ist vorgesehen, für die eine oder mehreren Sekundärwicklungen des Transformators HT_c -supraleitende Leiter, auf der Basis von $Bi2212$ -, $Bi2223$ -Bandleitern, diese in Silbermatrix ausgeführt, und/oder $YBa-CuO$ -Leiter auf metallischem Trägerband als bevorzugte Bei-
- 15 spiele vorzusehen. Es können auch andere HT_c -Supraleiter-Materialien und auch solche als Draht verwendet werden. Für die Primärwicklung des Transformators kann ebenfalls HT_c -Supraleitermaterial verwendet werden, es genügt aber für diese Spule auch Kupferdraht, der bei 77 K sogar sehr hohe spezifische
- 20 Leitfähigkeit hat, jedoch nachteiligerweise Joule'sche Verlustwärme erbringt. Als Windungsverhältnis von Primärspule zu jeweiliger Sekundärspule ist ein Verhältnis sehr viel größer als 1, vorzugsweise größer etwa 100 bis 1000, zu wählen. Der vorzugsweise zu verwendende Transformator
- 25 kern besteht insbesondere aus geblechtem Eisen, einem anderen weichmagnetischen Material oder ist ein Ferrit. Es kann auch ein Trafo mit lediglich Luftspulen verwendet werden.

- Die Figur 3 zeigt in einem gemeinsamen Kryostaten 100 eine
- 30 erfindungsgemäße Anordnung, bestehend im wesentlichen aus der supraleitenden Spule 11 des Elektromagneten 111 und der Flusspumpe 2 mit der Schalteranordnung 15, 16 und dem Transformator 13 mit der Primärspule 113 und den Sekundärspulen 213 und 313. Die Primärspule und die Sekundärspulen sind in-
- 35 einandergewickelt dargestellt. Das Bezugszeichen 12 weist auf die Speise-Stromquelle hin. Mit 413 ist eine Sondenspule be-

zeichnet, mit der der Magnetfluss im hier vorgesehenen Kern des Transformators 13 überwacht werden kann.

Die Figur 4 zeigt ein Ausführungsbeispiel zur Schaltung der Flusspumpe mit HT_c-supraleitenden Stromleitern und den hier als Schalter der Gleichrichterschaltung verwendeten MOSFET-Elementen. Die Schalter 15 und 16 umfassen je eine Parallelschaltung einer Anzahl n von MOSFETs 15₁ bis 15 _{n} bzw. 16₁ bis 16 _{n} . Auf die jeweils parallel geschalteten MOSFETs verteilt sich der zu schaltende elektrische Strom. Letzterer bestimmt, wie groß die Anzahl der jeweils vorzusehenden parallel zu schaltenden MOSFETs zu wählen ist.

Auch die Anschlüsse der Feldeffektelektroden 215₁ bis 215 _{n} sind miteinander parallel geschaltet und mit dem Steuergerät 25 verbunden. Entsprechendes gilt für die MOSFET-Elemente 16₁ bis 16 _{n} und deren Feldeffektanschlüsse 216₁ bis 216 _{n} .

Als derartige MOSFET-Elemente eignen sich besonders diejenigen des Typs BUZ 111S von Siemens/Infineon. Mit der Vielzahl der parallel geschalteten MOSFET-Elemente 15₁ bis 15 _{n} und 16₁ bis 16 _{n} lässt sich ein sehr geringer Durchlasswiderstand für den Strom im Stromkreis der Flusspumpe erreichen. Die Anzahl n der MOSFET-Elemente wird so groß gewählt, dass bei fließendem Nennstrom der Spannungsabfall an den parallel geschalteten MOSFET-Elementen höchstens in der gleichen Größenordnung wie derjenige Spannungsabfall ist, der an der supraleitenden Spule 11 des Elektromagneten 111 messbar vorliegt. Ein solcher Spannungsabfall liegt bei Werten kleiner 1 mV bis zu einigen mV. Es empfiehlt sich, handelsübliche MOSFET-Elemente, z.B. der angegebenen Type, bezüglich ihres Durchlasswiderstandes, und zwar des Durchlasswiderstandes bei den tiefen Betriebs-Temperaturen der Flusspumpe, einzeln auszusuchen. Bei Betrieb einer Flusspumpe der vorliegenden Erfindung empfiehlt es sich, diese MOSFET-Elemente bei einer Temperatur zwischen etwa 60 K und 130 K zu betreiben. Die Figur 4A zeigt, dass in einem solchen Temperaturbereich diese MOSFET-

Elemente sogar ein Minimum ihres Durchgangswiderstandes haben. Dies ist optimal nutzbar für die erfindungsgemäße Flusspumpe.

- 5 Die voranstehenden Ausführungen gelten sinngemäß auch für eine Gleichrichterschaltung der Flusspumpe gemäß der Figur 2 mit Brückenschaltung. In letzterem Falle wird die erfindungsgemäße Flusspumpe mittels vier Gruppen 15, 16, 115, 116 jeweils n-fach parallel geschalteter MOSFET-Elemente betrieben.

10

Die Figuren 5A und 5B zeigen in Aufsicht und Seitenansicht ein bevorzugtes konstruktives Ausführungsbeispiel eines Schalters 15, 16.

- 15 Diese zwei Gruppen 15₁ bis 15_n und 16₁ bis 16_n bzw. für eine Ausführung nach Figur 2 dann vier Gruppen MOSFET-Elemente der vorliegenden Erfindung sind in gut wärmeleitender Verbindung mit und auf z.B. einer gemeinsamen Basisplatte 51 oder verteilt auf mehreren Basisplatten aus z.B. Kupfer oder einem
20 anderen gut wärmeleitendem Material angeordnet. Eine solche Anordnung ermöglicht es, diese MOSFET-Elemente auf einer möglichst gleichen und/oder konstanten ausgewählten Arbeitstemperatur zu halten. Diese Arbeitstemperatur wird über einen Regelkreis mit Temperaturfühler 220 und mit ggf. zusätzlicher
25 Heizung 221 für die Basisplatte und die Transistoren gehalten.

- Mit einem ihrer jeweiligen Drain-Anschlüsse (D) sind die parallel geschalteten MOSFETs 15₁ bis 15_n bzw. 16₁ bis 16_n z.B.
30 mit der elektrisch leitenden Basisplatte 51 elektrisch verbunden. Der jeweils zweite Source-Anschluss (S) dieser MOSFETs ist mit der Zu- und Verbindungsleitung 315 für die MOSFETs 15₁ bis 15_n und 316 für die MOSFETs 16₁ bis 16_n elektrisch verbunden. Die Anschlüsse der Feldeffekt-Steuer-(Gate-)
35 -Elektroden 215 sind mittels der Verbindungsleitung 1215 miteinander und mit dem Steuersystem 25 verbunden. Entspre-

chendes gilt für die Feldeffekt-Steuerelektroden 216 und deren Verbindungsleitung 1216.

Es gibt praktische Fälle, in denen die Arbeitstemperatur der Spule 11 des Elektromagneten 111 vorgegeben geringer ist, als die der Basisplatte 51, z.B. bei 4,2 K oder 20 bis 30 K liegt. Für diesen Fall empfiehlt es sich, zwischen diesem Temperaturniveau und dem für die Basisplatte 51 und die MOSFETs optimalen, vorgesehenen Temperaturniveau solche elektrische Verbindungen 152 in Figur 4 als Übergänge zwischen jeweils den supraleitenden Anschluss-Zuleitungen der supraleitenden Spule 11 des Magneten und den Leitungen 20, 21 (siehe auch Figur 1) zu verwenden, die nur geringe Wärmeübertragung bewirken. Es eignen sich dafür HTS-Supraleiter-Stromzuführungen nach einer bekannten Bauart. Dies können z.B. solche aus Bi2212- oder YBaCuO-Massivmaterial oder auch Bi2223-Mono- oder Multifilamentleiter in AgAu-Matrix sein. Die Temperatur der MOSFETs wird mit Rücksicht auf in der Schaltung vorgesehene supraleitenden Leitungen z.B. 315, 316 unterhalb der Sprungtemperatur T_c dieser Leitungen, also bei etwa 60 bis 80 K liegen.

Die Figur 5B zeigt eine Seitenansicht zur Figur 5A mit den für die Figur 5A verwendeten Bezugszeichen. In Figur 5B ist eine Ausführungsform dahingehend gezeigt, dass die Basisplatte 51 mit hier dargestellt drei mechanischen Verbindungen 52 mit einer Plattform 53 verbunden ist. Diese Ausführungsform ist geeignet, wenn die Plattform 53 z.B. mit einem Magneten mit LT_c -Magnetspule auch thermisch verbunden ist, die auf sehr tiefer Temperatur gehalten ist. Die Verbindungen 52 sind dann auch als definiert bemessener Wärmeübertrager bzw. -bremse ausgelegt, mittels derer die Temperatur der Basisplatte 51 der MOSFETs auf der voranstehend angegebenen günstigen Temperatur gezielt gehalten werden kann. Es ist auch zu berücksichtigen, dass in den MOSFETs der Schaltung ein gewisses Maß an Verlustwärme auftritt, mit der die Basisplatte, ggf. zusätzlich zu einer vorgesehenen Heizung 221 derselben,

auf der gewünscht höheren Temperatur gehalten werden kann. Eine derartige Ausführungsform ist besonders geeignet für integrierten Aufbau von Schaltung und Supraleitermagneten in einem gemeinsamen Kryostaten-Gehäuse.

5

Die Dicke und die Summe der Querschnitte der Verbindungen 52 wird so bemessen, dass der über diesen Wärmewiderstand von der Basisplatte in Richtung der Wärmesenke bzw. tieferer Temperatur fließende Wärmestrom etwa gleich oder nur mäßig größer ist als derjenige Wärmestrom, den eine Heizung 221 und zusätzlich dazu diejenige Joul'sche Wärme liefert, die in den MOSFETs des jeweils leitenden Schalterzweigs (15 oder 16) bei darin mit maximaler Größe fließendem Strom auftritt. Es ist dies eine gemäß einer Weiterbildung der Erfindung vorgesehene Maßnahme, mit der die Leistung des erwähnten Heizers zur ge-
regelten Aufrechterhaltung konstanter Temperatur der MOSFET-Elemente zu minimieren ist.

15

Vorzugsweise wird die Wärmeableitung so bemessen, dass sie das 1,5- bis 3-fache der in den MOSFETs erzeugten Joul'schen Wärme ausmacht. Die zur Einhaltung bzw. zum Erreichen der Soll-Temperatur der Basisplatte erforderliche Wärmemenge wird mit der Heizung bereitgestellt.

20

Zur Bemessung einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung sind für eine Flusspumpe nach Figur 5A für einen Magneten eines Kernspintomographen z.B. 2 x 40 MOSFETs des Typs BUZ111S vorgesehen. Ein solcher MOSFET hat bei 70 K etwa 2,5 m Ω . Jeweils sind diese MOSFETs auf z.B. einer Basisplatte aus Kupfer, wärmemäßig mit dieser in gutem Kontakt, montiert. Bei z.B. einem Nennstrom von 80 Ampere, der in der Summe durch die Gruppe der jeweils parallel geschalteten MOSFET-Elemente fließt, tritt in diesen eine Verlustleistung von etwa 0,4 W auf. Zusammen mit 0,2 W Wärmezufuhr vom Heizer sind also insgesamt 0,6 W von etwa 70 K auf etwa 25 K über z.B. die oben-
erwähnten mechanischen Verbindungen 52 abzuleiten. Dies erfordert für eine wie oben erwähnte Verbindung einen Wert von

30

35

A/d = 4 cm (A = Gesamtquerschnitt; d = Dicke der Verbindung) bei Kunststoffen wie auch GFK (faserverstärkter Kunststoff) oder bei A/d = 0,2 cm bei Edelstahl Stützelemente dieser Verbindung mit beispielsweise einer Höhe von 1 cm bei GFK-Werkstoff von 4 cm² und bei Stahl von 0,2 cm² Querschnittsfläche.

Auch bei dieser erfindungsgemäßen Ausführung einer dem Prinzip nach bekannten Flusspumpe kann der Transformator 13 primärseitig mit Sinus- oder mit Rechteck- oder dgl. Spannung mit alternierendem Vorzeichen gespeist werden. Der Sinusfrequenz bzw. der Rechteck-Pulsfolge entsprechend erfolgt zeitlich koordiniert die Ansteuerung der Steuerelektrode, nämlich der Feldelektroden 215, 216 der als Schalter verwendet elektrisch leitend zu öffnenden oder zu sperrenden MOSFET-Elemente. Diese Ansteuerung erfolgt mit Rechteckspannungsimpulsen mit größer/gleich 8 Volt bei wie oben angegebenem oder ähnlichem Typ verwendeter MOSFET-Elemente.

Ein großer Vorzug der erfindungsgemäßen Ausführung einer dem Prinzip nach bekannten Flusspumpe mit hier jedoch MOSFET-Elementen als Schalter in der Gleichrichterschaltung der Flusspumpe ist, dass diese MOSFET-Elemente mit Frequenzen bis zu einigen MHz angesteuert werden können. Diese hohe Ansteuerungsfrequenz ermöglicht es, den Transformator 13, verglichen mit bekannten Ausführungen, sehr klein auszuführen. Ein für die Erfindung zu verwendender Transformator 13 kann auch mit Ferrit-Kern oder sogar auch kernlos ausgeführt sein. Die sekundäre Ausgangsspannung des Transformators kann entsprechend den zulässigen Betriebsspannungen der MOSFET-Elemente, z.B. beim Typ BUZ 111S bis 25 Volt bei einer wie in Figur 1 dargestellten Zweiwegschaltung oder bis sogar 50 Volt bei einer Brückenschaltung gemäß Figur 2, gewählt werden. Dieser technische Vorteil, der mit der Erfindung verbunden ist, ermöglicht ein erheblich rascheres Aufladen und Wiederentladen des Elektromagneten 111, nämlich verglichen mit einer Ausführungsform mit Schaltern mit HT_c-supraleitendem Material.

Als Weiterbildung der Erfindung sind für den Schutz der aus MOSFET-Elementen bestehenden Schalter 15, 16 (115, 116) Halbleiter-Dioden vorgesehen, die dem jeweiligen Schalter in Durchlassrichtung gepolt parallel geschaltet sind.

5

Mittels der Flusspumpe 2 wird der Elektromagnet 111 durch Stromzufuhr aus der Stromquelle 12 aufgeladen. Hierzu sei auch auf die Figur 6 hingewiesen. Diese zeigt in ihren Zeilen A bis F die nachfolgend beschriebenen Vorgänge. Die Vorgänge der linken Hälfte der Figur 6 betreffen das vollständige Aufladen des Elektromagneten. Die dazu rechte Hälfte der Figur 6 bezieht sich auf die Vorgänge des Nachladens zur Kompensation zeitlich aufgetretener Verluste, d.h. die Vorgänge zur zeitlichen Stabilisierung des Magnetfeldes des Elektromagneten 111.

15

Die Primärwicklung 113 des Transformators 13 wird wie in Zeile A, linke Hälfte, mit insbesondere zeitlich ununterbrochenen, vorzugsweise trapezförmigen Spannungs-/Stromimpulsen mit aufeinanderfolgend entgegengesetzten Vorzeichens gespeist. Die Zeile B zeigt die zu den Impulsen der Zeile A gehörenden, zeitlich voneinander beabstandeten Impulse an den Sekundärspulen 213 und 313 des Transformators 13. Die Zeile C zeigt dazu den Anstieg der Aufladung der Magnetspule 111.

25

Die rechte Seite der Figur 6, die die zeitliche Stabilisierung der Magnetfeldstärke des Elektromagneten 111 betrifft, unterscheidet sich vom Aufladevorgang der linken Hälfte der Figur 6 darin, dass die Vorzeichenwechsel des Primärstromes bzw. des magnetischen Flusses im Transformator 13 zeitlich gestreckt vorgesehen sind, nämlich so, wie das Wiederaufladen quantitativ erforderlich ist und dies aus der Zeile C, rechte Hälfte, zu ersehen ist.

30

Das Aufladen des Elektromagneten 111 bzw. das Nachladen desselben für zeitliche Konstanz seines Magnetfeldes erfolgt nach Figur 6 hier durch Einstellen der Impulsfrequenz

35

und/oder der Impulsamplitude und entsprechende Steuerung der Schalter der Gleichrichterschaltung der Flusspumpe. Die Pulsfrequenz kann vorzugsweise durch bzw. mit einem Regelkreis vorgegeben werden.

5

Der Regelkreis umfaßt z.B. Maßnahmen zur periodischen NMR-Feldmessung im bzw. am Magneten. Festgestellt wird z.B. die Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert der NMR-Frequenz. Die auftretende Differenz wird wieder ausgeglichen durch entsprechend proportionale Änderung der Pulsfrequenz, mit der die Flusspumpe am Eingang, d.h. an der Primärspule 113 des Transformators 13 angesteuert wird.

10

Als alternative Maßnahme zum Erreichen einer Feldstabilisierung kann im Bereich, in dem die erforderliche Tieftemperatur herrscht, diese Abweichung auch durch eine Strommessung oder mit einem Hall-Sensor ermittelt werden und wiederum in korrigierte Pulsfrequenz umgesetzt werden.

15

Entsprechend den dargelegten Vorgängen der Figur 6 kann ein einmal aufgeladener Elektromagnet 111 in sinngemäß reversibler Weise mittels der Flusspumpe, diese also in umgekehrter Richtung arbeitend, wieder entladen werden. Hierbei wird bei gleichem Pulsschema jeweils der Schalter geöffnet, der beim Aufladen geschlossen war und umgekehrt.

20

Erfindungsgemäß ist vorgesehen, Flusspumpe 2 und Magnet 111 vorteilhafterweise zusammen in einem gemeinsamen Kryostaten anzuordnen. Die Temperatur in diesem Kryostaten kann auf die für den Elektromagneten 111 vorgesehenen Temperaturwert, z.B. den oben genannten Wert T_0 eingestellt werden, nämlich so bemessen, dass das HT_c -Supraleiter-Material der Spule 11 des Magneten die erforderliche Stromtragfähigkeit im erzeugten Magnetfeld hat. Es kann dann vorgesehen sein, dass die Grundplatte 46 der Schalteranordnung auch auf einer höheren Temperatur, diese jedoch unterhalb der Temperatur T_c des Supraleiter-Materials, gehalten werden.

30

35

Patentansprüche

1. Vorrichtung mit einer Supraleiter-Flusspumpe (2) mit einem Transformator (13) mit sekundärseitig wenigstens einer supraleitenden Spule (213, 313) in der sekundärseitigen Gleichrichterschaltung mit wenigstens zwei steuerbaren (25) Schaltern (15, 16; 115, 116), diese Pumpe vorgesehen zur Stromspeisung (21, 22) in eine supraleitende Spule (11) eines Elektromagneten (111), d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die jeweilige sekundärseitige Spule (213, 313) aus HT_c-Supraleitermaterial besteht und als steuerbare Schalter MOSFETs (15, 16; 115, 116) in der sekundärseitigen Gleichrichterschaltung vorgesehen sind.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Flusspumpe (2) und die supraleitende Spule (11) des Elektromagneten (111) zusammen in einem gemeinsamen Vakuumraum eines Kryostaten (100) angeordnet sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass für einen jeweiligen einzelnen Schalter (15, 16; 115, 116) eine Anzahl n mit $n = 1, 2, 3, \dots$ miteinander elektrisch parallel geschaltete MOSFETs (15₁ bis 15_n, 16₁ bis 16_n; 115₁ bis 115_n, 116₁ bis 116_n) vorgesehen sind.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die verwendeten MOSFETs (15₁ ... 116_n) bezüglich ihres elektrischen Durchlasswiderstandes bei der vorgesehenen tiefen Betriebstemperatur so ausgewählt sind, dass nur MOSFETs mit sehr geringem Durchlasswiderstand in der Gleichrichterschaltung enthalten sind.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die vorgese-

henen MOSFETs (15₁ ... 116_n) auf einer Basisplatte (51) aus gut wärmeleitendem Material angeordnet sind.

5 6. Vorrichtung nach Anspruch 5, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t, dass für die Basisplatte (51) eine elektrische Heizung (221) für das Einstellen/Einhalten einer vorgegebenen Temperatur dieser Basisplatte (51) vorgesehen ist.

10 7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 6, d a -
d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass auf der Basisplatte (51) ein Temperaturfühler (220) für einen Temperatur-Regelkreis für die Betriebstemperatur der MOSFETs vorgesehen ist.

15 8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 8, d a -
d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Basisplatte (51) mittels mechanischer Verbindungen (52) mit wärmeleitender Eigenschaft mit einer vorgesehenen Wärmesenke (53)
20 verbunden ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t, dass die Wärmesenke eine Plattform (53) ist.

25 10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, d a d u r c h
g e k e n n z e i c h n e t, dass die Anzahl und die Bemessung der vorgesehenen mechanischen Verbindungen (52) so ausgewählt sind, dass in den MOSFET-Elementen der Schalter (15₁
30 ... 116_n) erzeugte elektrische Verlustleistung und ggf. vorgesehene Heizleistung des Heizers (221) im zeitlichen Gleichgewicht sind mit der durch die mechanischen Verbindungen (52) hindurch in die als Wärmesenke wirkende Plattform (53) abfließende Wärmemenge.

35 11. Vorrichtung nach Anspruch 8, 9 oder 10, d a d u r c h
g e k e n n z e i c h n e t, dass die vorgesehenen mechani-

schen Verbindungen (52) der Basisplatte (51) der Schalter mit den MOSFETs mit der Wärmesenke hinsichtlich ihrer Wärmeableitungen so bemessen sind, dass in bestimmungsgemäßem Betrieb der Vorrichtung deren wärmeableitende Wirkung das 1,5- bis 3-fache der Summe der in den MOSFETs erzeugten Joule'schen Wärme erreichen kann.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, da -
durch gekennzeichnet, dass ein Transformator (13) mit Ferritkern vorgesehen ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, da -
durch gekennzeichnet, dass ein kernloser Transformator vorgesehen ist.

14. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, da durch gekennzeichnet, dass die Speisung des Transformators (13) der Flusspumpe (2) mit Stromimpulsen (Figur 6, Zeile A) erfolgt.

15. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 oder nach Anspruch 14, da durch gekennzeichnet, dass die Speisung im Frequenzbereich von Netzfrequenz bis MHz ausgeführt wird.

16. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 oder nach Anspruch 14 oder 15, da durch gekennzeichnet, dass die Stromstabilisierung im Elektromagneten (111) durch Regelung (413) der Frequenz der Impulse der Speisung des Transformators (13) der Flusspumpe (2) ausgeführt wird.

17. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 oder nach Anspruch 14, 15 oder 16, da durch gekennzeichnet, dass die Stromstabilisierung im Elektromagneten (111) durch Regelung der pri-

märseitigen Stromamplitude des Transformators (13) der Flusspumpe (2) ausgeführt wird.

5 18. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 oder nach einem der Ansprüche 14 bis 16, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass für die MOSFETs der Schalter (15₁ ... 116_n) eine vorgegebene konstante Temperatur eingehalten wird.

10 19. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 oder einem der Ansprüche 14 bis 18, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass durch Regelung der Heizung (221) eine vorgegebene Temperatur der Basisplatte (51) gegenüber der tieferen Betriebstemperatur der
15 Spule (11) des Elektromagneten (111) eingehalten wird.

Zusammenfassung

Flusspumpe mit Hochtemperatursupraleiter und damit zu betreibender supraleitender Elektromagnet

5

Vorrichtung mit Flusspumpe (2) und mit dieser zu speisendem Elektromagneten (111) für die Erzeugung hochkonstanter Magnetfelder hoher Feldstärke. In der Flusspumpe (2) des Gleichrichtertyps sind als Schalter MOSFETs verwendet, die bei Betriebstemperaturen für HT_c -Supraleitermaterial vorzusehen sind. Insbesondere sind Flusspumpe (2) und Spule (11) des Elektromagneten (111) in ein und demselben Kryostaten Gehäuse angeordnet.

10

15 FIG 1

1/4

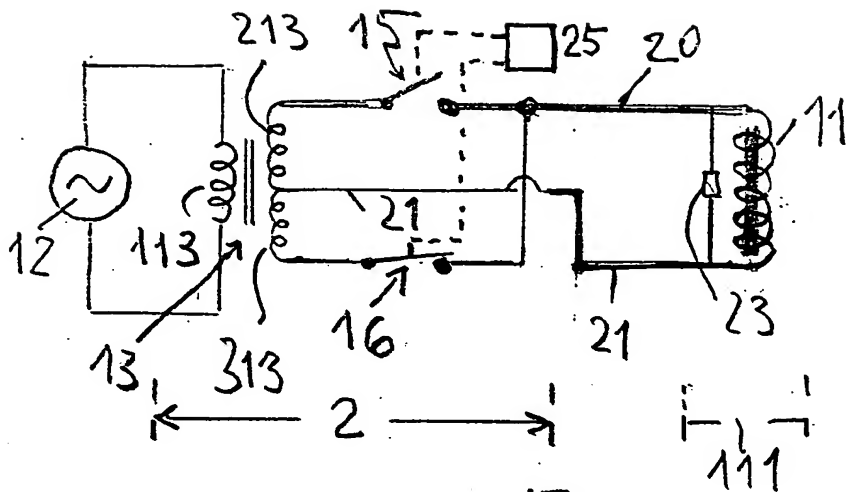


Fig 1

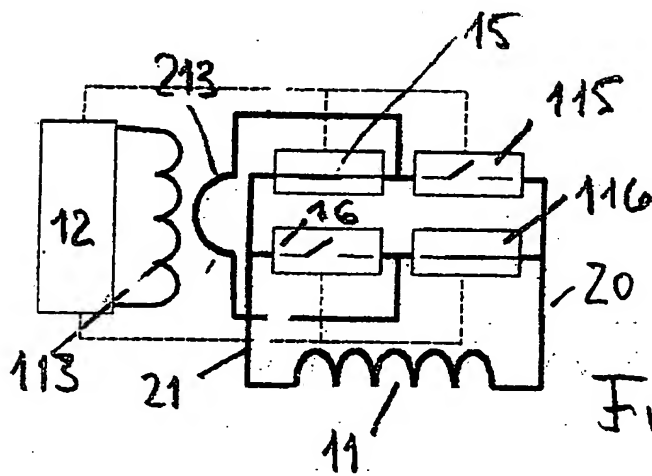


Fig 2

2/4

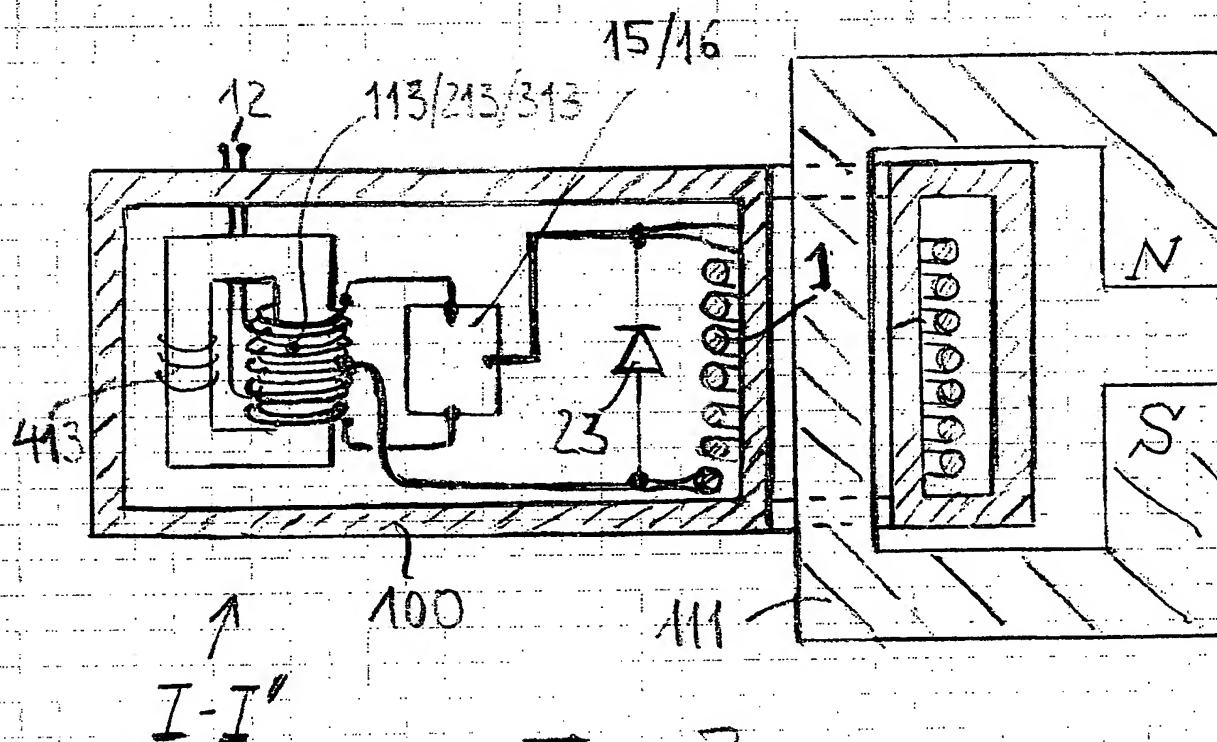
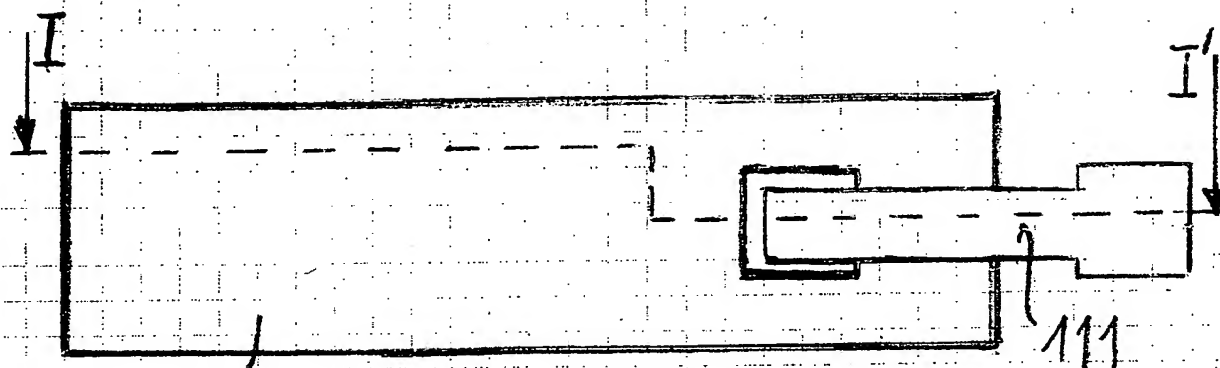


Fig 3

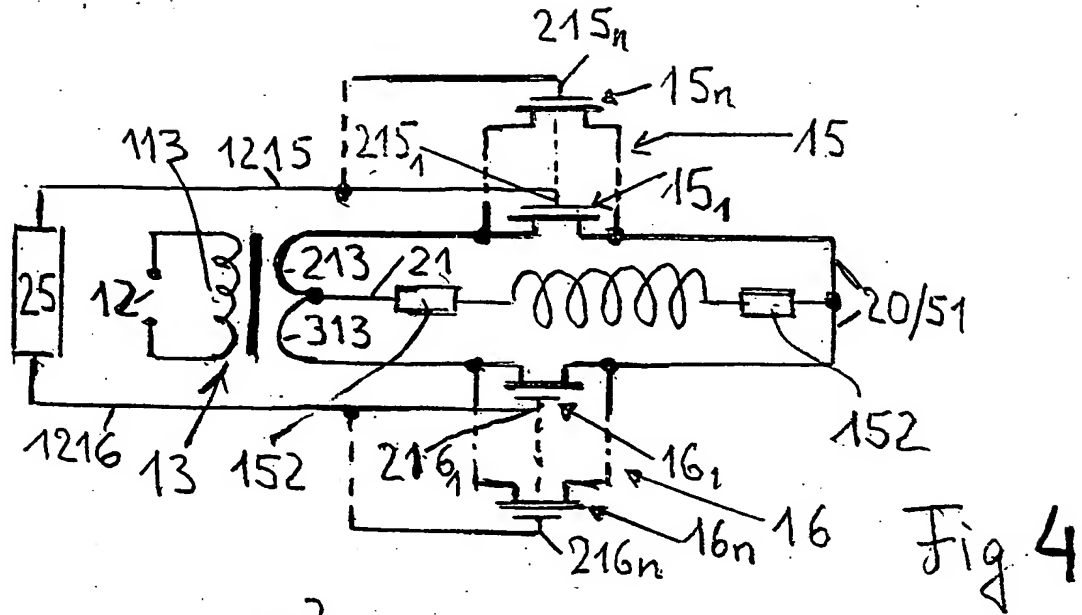


Fig 4

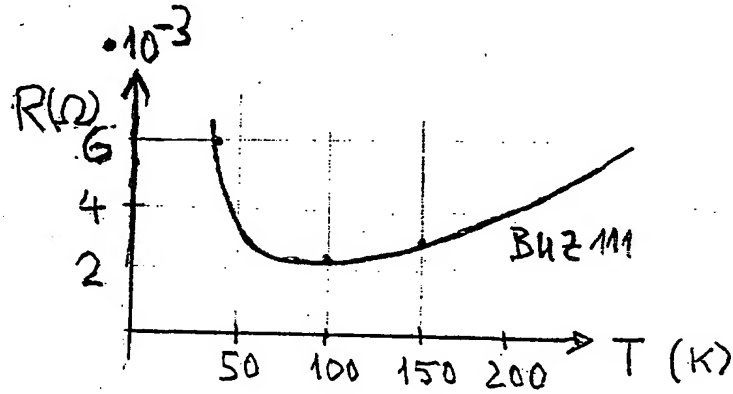


Fig 4A

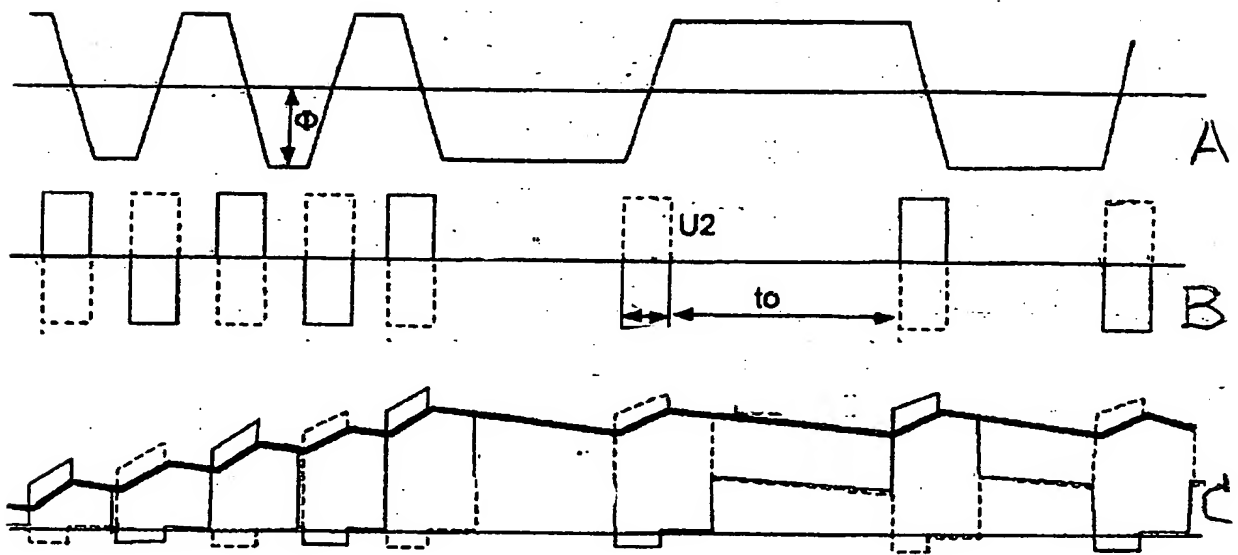


Fig 6

